



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20190086

振动信号处理与多功能时频分析系统的研究

孙苗钟, 殷磊, 谈炳发, 崔世海, 徐元利

(天津市轻工与食品工程机械装备集成设计与在线监控重点实验室, 天津科技大学机械工程学院, 天津 300222)

摘要: 为了实现振动信号预处理和信号分析, 基于 MATLAB 与 Delphi 混合编程设计开发了一套集信号处理与多功能时频分析于一体的振动测试系统. 应用组件对象模型的技术得到 MATLAB 平台下的各种信号处理与分析动态链接库文件, 并安装于 Delphi 平台的 ActiveX 组件中, Delphi 语言编程产生界面调用 DLL 文件实现 32 种信号处理与分析功能方法; 提出并实现多种新的时频组合方法, 这些组合方法能更好地提取非平稳信号的频率特征成分; 通过仿真信号与实例验证了该系统的可靠性. 该系统可脱离 MATLAB 平台独立运行于 Windows 操作系统, 操作方便, 易于扩充.

关键词: 组件对象模型; 混合编程; 信号处理; 时频分析

中图分类号: TP274⁺.5; TP311 文献标志码: A 文章编号: 1672-6510(2020)04-0058-07

A New System for Vibration Signal Processing and Multifunctional Time-frequency Analysis

SUN Miaozhong, YIN Lei, TAN Bingfa, CUI Shihai, XU Yuanli

(Tianjin Key Laboratory of Integrated Design and On-line Monitoring for Light Industry & Food Machinery and Equipment, College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

Abstract: In order to realize vibration signal processing and analysis, a vibration test system of signal processing and multifunctional time-frequency analysis has been developed, based on mixed programming with MATLAB and Delphi. Various dynamic-link library (DLL) files of MATLAB signal processing and analysis were obtained and installed in Delphi ActiveX module, using component object model (COM) based on mixed programming technology. The system interface was designed and programmed in Delphi language, using DLL files to get thirty-two functional methods of signal processing and analysis. Furthermore, some new time-frequency combined analysis methods were proposed and performed to extract clearer features of non-stationary vibration signals. The new system is verified by simulation and a case study. It can run in Windows system separated from MATLAB platform. The system operates easily and can expand in many different ways.

Key words: component object model; mixed programming; signal processing; time-frequency analysis

振动信号处理与分析的研究能优化设计生产, 实时监测设备运行状态, 及时发现故障和实施故障诊断, 保障生产质量, 提高设备可靠性等^[1]. 如何高效地开发出集信号处理与分析方法于一体的振动测试系统, 一直是科研人员研究开发的技术难题. 不少学者对振动测试系统进行研究与设计, 取得了一些成果. 如屈威等^[2]采用 LabVIEW 开发出多通道的振动测试系统, 用于高铁桥梁的振动测试, 但该系统不具备时频分析功能; 唐进元等^[3]采用 LabVIEW 生产者-

消费者模式开发出用于齿轮传动的振动测试系统, 分析功能比较单一; 唐奕等^[4]使用 LabVIEW 编程语言设计了振动信号分析系统, 时频分析部分仅实现短时快速傅里叶变换 (STFT) 和 Helbert-Huang 变换 (HHT). 以上开发的振动测试系统运用 LabVIEW 及其他可视化编程工具, 如 VB、VC++ 等编程平台, 这些平台对各种振动测试信号处理和分析方法编程难度较大^[5].

MATLAB 是集数值计算、时频分析、信号处理和

收稿日期: 2019-03-07; 修回日期: 2019-09-09

作者简介: 孙苗钟 (1964—), 男, 浙江诸暨人, 副教授, sunmzh66@sina.com

图形分析等强大功能于一体的编程平台,提供大量的函数库,具有较强的信号分析和绘图能力,可以生成面向对象编程的组件对象模型(COM)组件;使用MATLAB对信号处理与分析(尤其是时频分析)的算法设计效率高,但不能脱离MATLAB集成环境工作,运行速度慢,界面开发能力差^[6]. Delphi是面向对象的可视化编程语言,适合图形界面的开发,但要实现对各种信号处理与分析方法的编程十分困难.如果将两者混合编程,就可充分利用MATLAB和Delphi各自的优点,由MATLAB完成信号处理与分析过程和绘图功能,在Delphi语言开发的程序界面中嵌入MATLAB COM组件^[7-8].本文通过MATLAB与Delphi混合编程,基于COM组件技术与实现了集32种信号处理与分析功能方法的振动测试系统,可以完成信号数据回放、信号数字滤波

处理、平稳信号时域与频域分析和非平稳信号时频联合分析的方法.在时频分析方法中,提出了时频组合法并实施完成,如经验模态分解(EMD)与快速傅里叶变换(FFT)组合(EMD-FFT)等,这些组合法能更彻底地提取非平稳信号的特征频率成分,分析更为方便且结果表达更为深刻.该系统可通过扩充COM组件增加分析功能,且系统软件可以脱离于MATLAB环境独立运行于Windows操作系统.

1 系统编程框图与功能设计

系统的编程框图如图1所示.“振动信号处理与多功能时频分析”系统由信号分析设置、信号数字滤波处理、数据回放、平稳信号分析和非平稳信号分析组成.

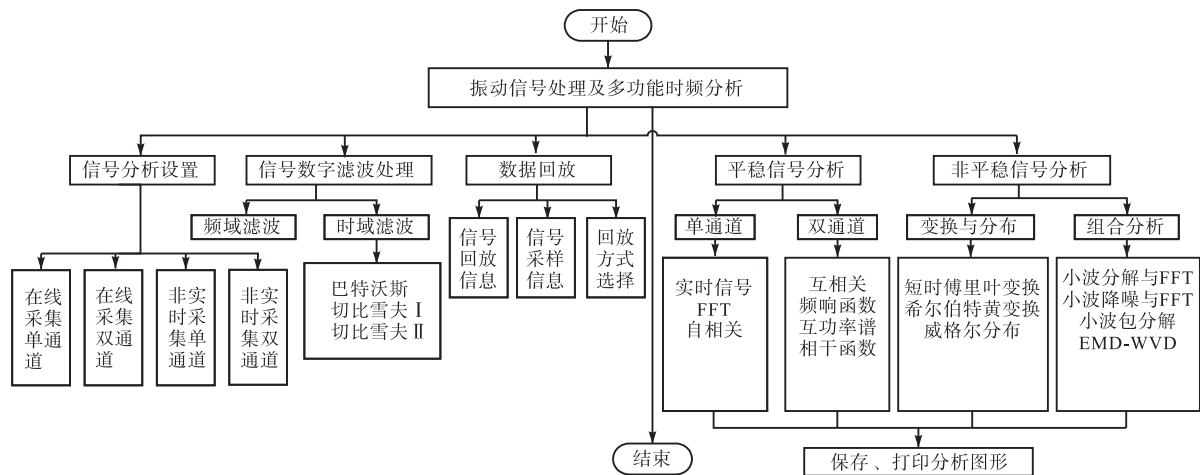


图1 系统的编程框图

Fig. 1 Flow chart of system programming

1.1 信号分析设置

信号分析设置分为4类分析:在线采集单通道分析、在线采集双通道分析、非实时采集单通道分析及非实时采集双通道分析.在线采集分析指的是对实时采集后的信号分析.非实时采集分析指的是对以前数据的信号分析(包括分析后保存的数据文件).信号分析设置中要求输入分析通道数、采样频率、分析点数、输入文件名、输出文件名(要求输出).

1.2 信号数字滤波处理

采集后的信号可进行选择性频率的数字滤波,增加信号的预处理能力.运用MATLAB平台中的频域滤波方法和时域滤波方法,能进行高通、低通、带阻和带通4种方式滤波,时域滤波可选择巴特沃斯、切比雪夫I和切比雪夫II3种方法.需要输入不同的

截止频率、通带波动系数和阻带波动系数.

1.3 数据回放

要对已存测试信号进行不丢点和准确性的验证,就需要进行数据重新回放,观察信号整个时间历程.图2中的波形回放主窗口内是采集到的8个通道波形回放.即是一台双通道SF2-DDS函数信号发生器分别发生A路100Hz、峰值电压1V的正弦波和B路100Hz、峰值电压1.5V的方波,A路正弦波同时接数据采集卡的0、2、4、6通道、B路方波同时接数据采集卡的1、3、5、7通道.通过回放各个波形完好无缺.下面是数据回放窗口,可检查每个采集点的数据大小.其左边是信号回放的信息和采样信息,包括回放速度、文件长度、通道点数、屏幕位置、量程、通道频率和通道总数.本次选择回放速度点数为

20. 总数据文件长度达 139 420 点, 每个通道数据为 17 427 点.

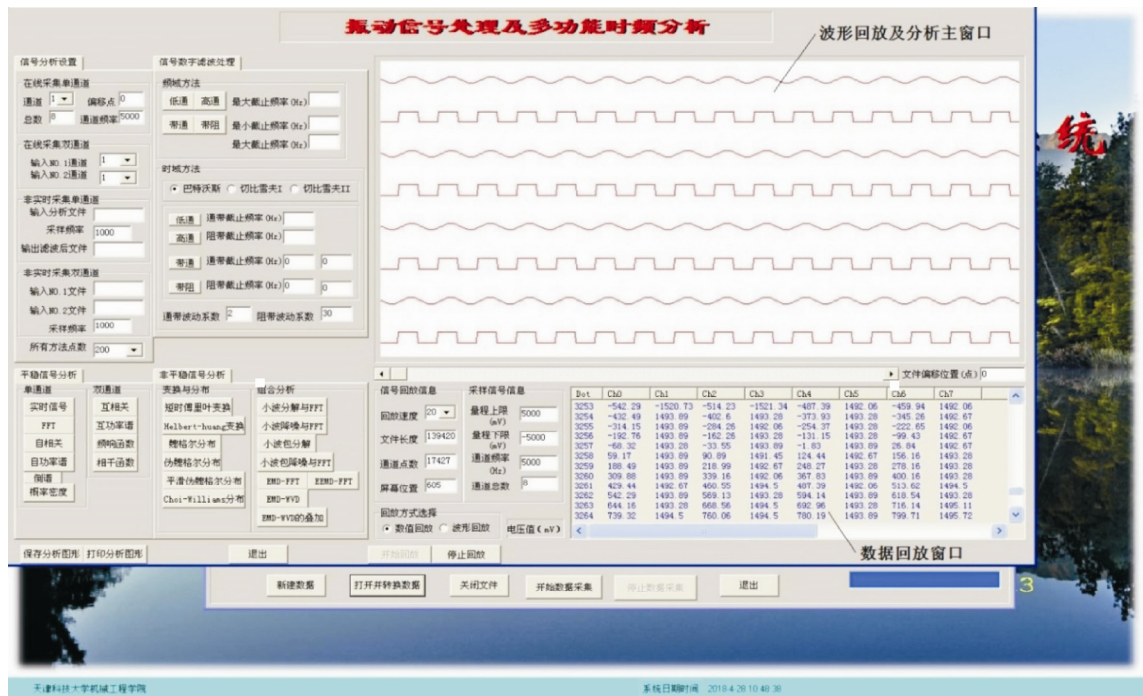


图 2 振动信号处理及多功能时频分析系统界面

Fig. 2 System interface of vibration signal processing and multi-function time-frequency analysis

1.4 平稳信号分析

平稳信号分析又分为单通道分析和双通道分析, 单通道分析的方法有实时信号波形显示、快速傅里叶变换(FFT)、自相关函数、自功率谱密度、倒谱和概率密度函数; 双通道分析的方法有互相关函数、互功率谱密度、频率响应函数和相干函数.

1.5 非平稳信号分析

该部分为系统分析的核心, 分为变换与分布和组合分析两部分, 变换与分布的方法有短时快速傅里叶变换(STFT)、Helbert-Huang 变换(HHT)、魏格尔分布(WVD)、伪魏格尔分布(PWVD)、平滑伪魏格尔分布(SPWVD)和 Choi-Williams 分布(CWD). 组合分析的方法有小波分解与 FFT、小波降噪与 FFT、小波包分解、小波包降噪与 FFT、EMD-FFT、EEMD-FFT、EMD-WVD 和 EMD-WVD 的叠加.

本系统还具有保存或打印分析波形的功能.

2 混合编程过程

2.1 COM 组件技术

组件对象模型(COM)为 Windows 提供了一种面向对象的、可扩充的通信协议, 通过此协议, 任何编程语言、不同平台和彼此独立的对象都可以实现连

通. MATLAB 通过调用外部编译器对函数文件编译, 使用 COM Builder 生成 COM 组件的动态链接库(DLL)文件, Delphi 通过安装、调用该 DLL 文件, 实现 MATLAB 和 Delphi 之间的数据通信, 从而实现混合编程^[8].

2.2 生成 DLL 文件并注册

MATLAB 平台拥有各种信号处理与分析函数和强大的绘图函数. 可编写各种函数 M 文件(子程序), 该文件可以接受和返回参数. 在 MATLAB 命令窗口中输入 mex-setup, 选择外部编译器 Microsoft Visual C++ 6.0. 再输入命令 comtool, 弹出 COM 组件创建窗口, 输入组件名字, 点击菜单中的 Build COM Object 进行编译, 编译成功后形成相应的动态链接库(DLL)文件, 该文件会在 Windows 系统中完成注册^[9].

2.3 安装 DLL 文件

在 Delphi 平台中, 点击菜单选项中的 Project Import Type Library, 弹出窗会显示上面注册后的各种类型库(DLL)文件, 选择所需 DLL 文件, 安装完毕后就就会在 ActiveX 类中出现相应的组件. 双击组件会在 Delphi 的编程窗口中出现相应的函数类, 如图 3 为系统主界面窗口调用各函数类情况, 在 Delphi 的子程序中调用相应的分析方法函数类, 实现该方法与

MATLAB 数据接口的连接与通信.

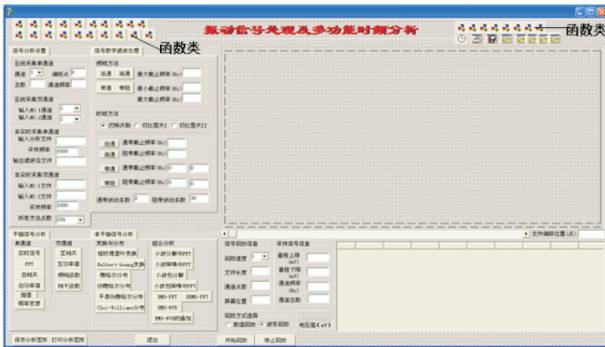


图3 系统编程主界面窗口调用各函数类

Fig. 3 Function classes in the main system programming interface

混合编程的流程框图如图4所示.

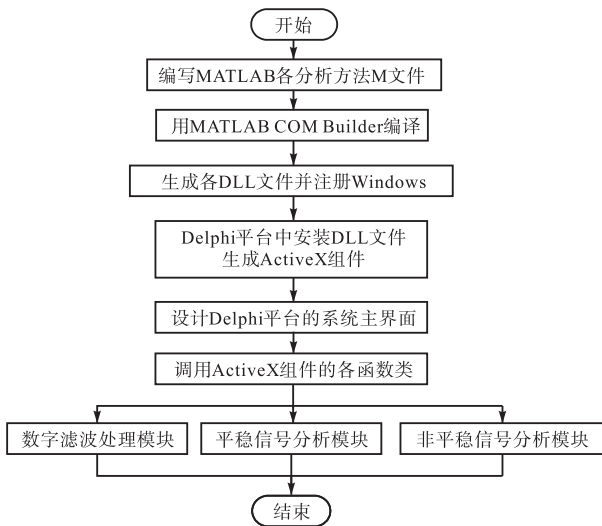


图4 混合编程的流程框图

Fig. 4 Flow chart of mixed programming

3 时频分析的组合方法实施

在非平稳信号的时频分析中,为了更好地提取非平稳信号的频率特征信息,在实施小波变换(WT)、EMD和EEMD等方法时采用2种或3种方法的组合(组合方法)分析,如WT-FFT、EMD-WVD和EEMD-FFT等,这可使结果分析更为深刻和清晰^[10].以经验模式分解与魏格尔分布(EMD-WVD)组合方法为例说明其实施过程,该方法采用了EMD、相关系数法和WVD3种方法进行组合对非平稳信号分析.

经验模式分解由于种种原因存在过分解现象,过分解产生的原因主要有以下几方面:局部均值的数值计算方法的插值误差、边界效应的影响、终止筛选标

准的不严格等.过分解使得到的分量个数比原信号组成分量多,把非原信号组成成分的分量称为“伪分量”^[10].用相关系数法来剔除“伪分量”,采用EMD分解后的各个内禀模式函数(IMF)与原信号进行相关得到各个相关系数,当相关系数很小时,就可判断该分量为伪分量,可能剔除.由于WVD在非平稳信号分析具有较好的时频聚集性和分辨率^[11],所以再用WVD方法对剩余的IMF进行分析,得到各WVD分布的时频谱图,分析结果更为清晰,信号被分解后的各频率成分更清晰地表达出来.

4 仿真信号验证系统

为了验证系统的分析效果与可靠性,运用系统中多种分析方法对一仿真信号进行分析比较.

设仿真信号的解析表达式为

$$x(t) = t + \sin(2\pi \cdot 20t) + \cos(2\pi \cdot 100t + \sin(2\pi \cdot 20t)) + \sin(2\pi \cdot 200t) \quad (1)$$

该信号是由一个线性趋势项 t ,两个基频分别为 20 Hz、200 Hz 的正弦波和一个基频 100 Hz 并被基频 20 Hz 正弦波调频的余弦波叠加组成的非平稳信号.对其调频部分的频率分析,得角频率:

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} = \frac{d(2\pi \cdot 100t + \sin(2\pi \cdot 20t))}{dt} = 200\pi + 40\pi \cos(40\pi t) \quad (2)$$

$$f(t) = \frac{\omega(t)}{2\pi} = 100 + 20 \cos(40\pi t) \quad (3)$$

由式(3)可得其频率变化范围为 80 ~ 120 Hz,且以余弦波规律变化.

仿真信号的波形和FFT分析后的频谱图(输出打印得到)如图5所示.输入采样点数1000,采样频率1000 Hz.

从频谱图可知20、100、200 Hz基频成分出现分明,这是符合原信号成分的.由于在FFT计算中对信号进行截断,并采用了窗函数(本系统采用汉宁窗),会产生截断和渗漏效应,明显地在100 Hz处20 Hz正弦波调频成分表达不清楚,在频率为零附近的低频成分是不符合趋势项分析要求的,说明FFT对非平稳信号分析存在缺陷.

应用时频组合方法(EMD-WVD)对仿真信号EMD分解后各IMF波形以及对各IMF用WVD分析后的时频谱图如图6所示.在图6(b)中标出了各IMF与原信号的相关系数,分别为:0.6361、0.5489、0.5544和0.0327.显然,IMF1、IMF2和IMF3与原

信号相关, IMF4 与原信号几乎无相关. 从 WVD 分析可知, IMF1、IMF3 分别是 200 Hz、20 Hz 正弦波, IMF2 是基频 100 Hz 被基频 20 Hz 正弦波调频的余

弦波, IMF4 为伪 IMF, 应剔除, Res 是线性趋势项 t . 可见采用这种组合方法来分析非平稳仿真信号显示其优点.

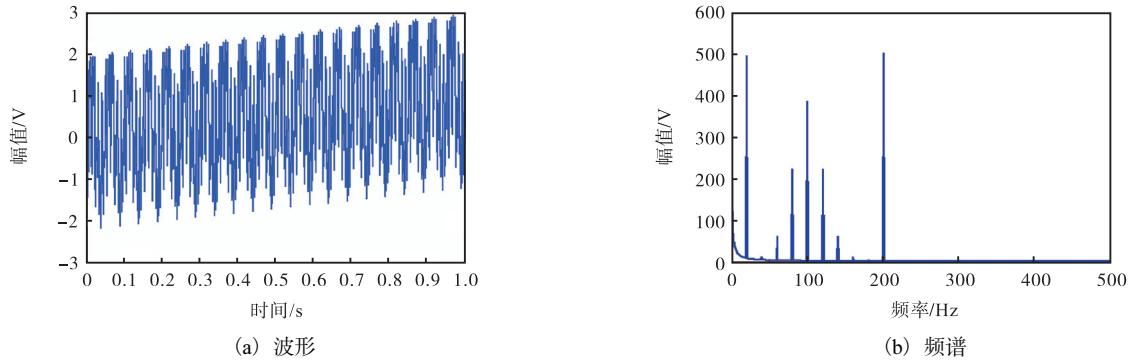


图 5 仿真信号的波形及 FFT 分析后的频谱

Fig. 5 Simulation signal waveform and its spectrum

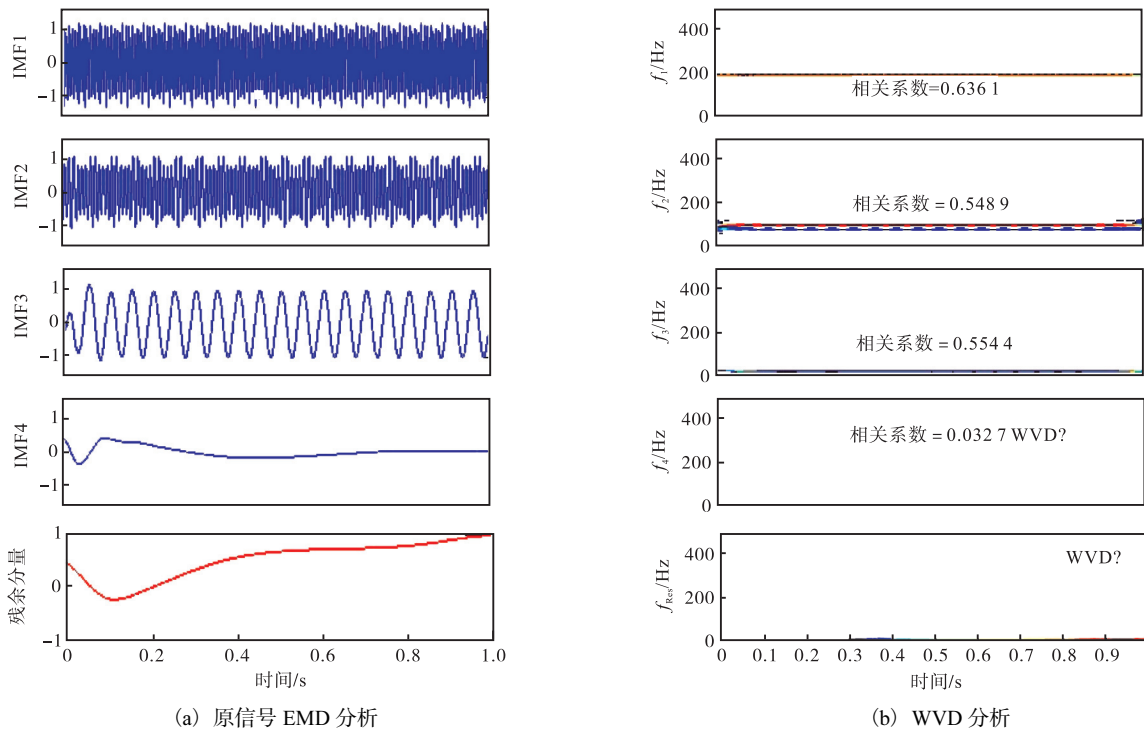


图 6 仿真信号用 EMD-WVD 分析后的结果图

Fig. 6 Results of simulation signal analyzed with EMD-WVD

5 实例分析

一台 S3SL 型砂轮机转速为 2850 r/min, 即工频 f_0 为 47.5 Hz, 振动剧烈噪声大, 达到 96.2 dB. 测试系统的硬件组成框图如图 7 所示.

用传感器提取砂轮机在工频转速下其机壳上的垂直振动信号, 选择采样频率为 1000 Hz, 取数据长度 1000 点, 运用本系统分析. 砂轮机原信号、频域方法滤波后的信号及其频谱图如图 8 所示. 频域方法滤波是利用 FFT 快速算法对输入信号采样数据进行

离散傅里叶变换分析其频谱, 根据滤波要求, 将需要滤除的频率成分直接设置成零或加渐变过渡带后再设置成零. 滤波时采用低通滤波方式, 截止频率取 300 Hz, 由于其频率特性, 对频域数据的突然截断造成的谱泄会造成滤波后的时域信号出现失真变形, 但频域方法具有较好的频率选择性和灵活性. 砂轮机原信号、小波滤波后的信号及其频谱图如图 9. 小波分解时, 对于不同的信号, 应选择不同的小波基. 小波变换相当于通过小波的尺度因子和时移因子的变化去观察信号, 尺寸因子大可观察信号的总体, 尺寸

因子小可观察信号的细节. 本系统选择广泛使用的 Daubechies (db) 小波基, 适中选择 5 层小波, 适合大多数信号. 分解后取对第一层重构系数 a_1 (信号的低频成分), 对上面两图中信号滤波后的频谱图进行比较, 结果吻合很好, 证实了两种滤波方法的可靠性. 从滤波后的信号频谱图中反映了砂轮机振动信号低频区域内各倍频的频率特征成分信息, 即低频处

的 1~5 倍频峰值十分明显, 尤其是 1 倍频 ($1f_0$).

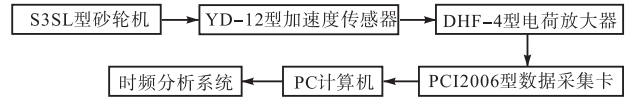


图 7 砂轮机测试系统的硬件组成框图

Fig. 7 Hardware framework of the testing system of the grinding machine

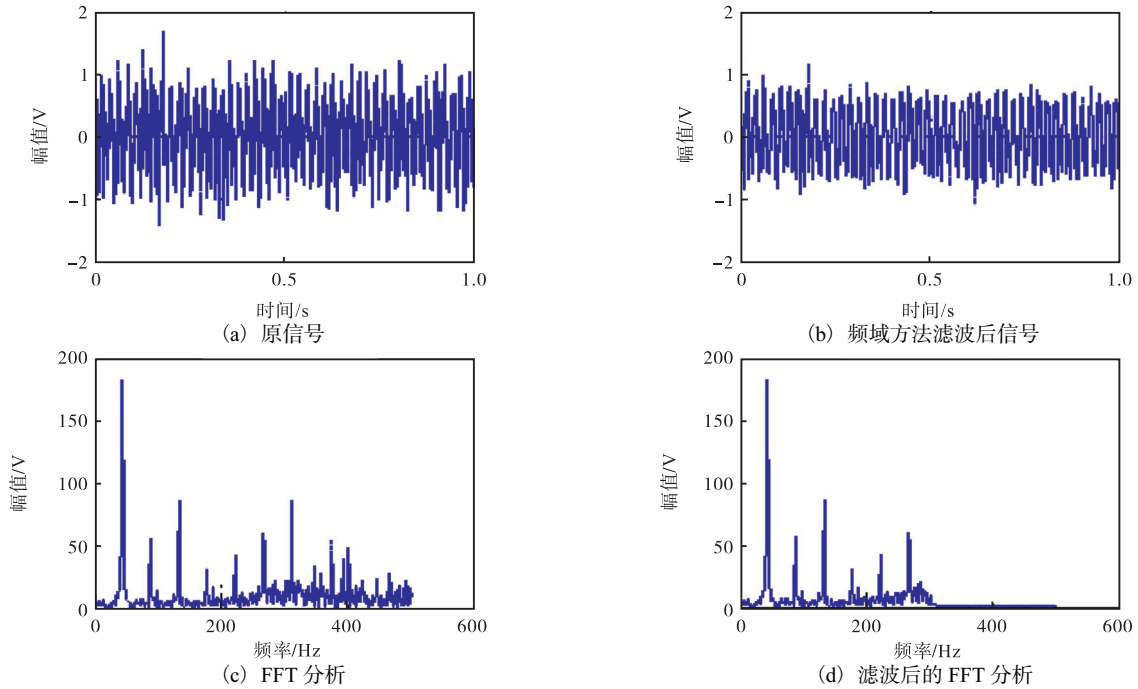


图 8 砂轮机原信号、频域方法滤波后信号及其频谱图

Fig. 8 Grinding machine original signal, filtered signal and their spectrogram

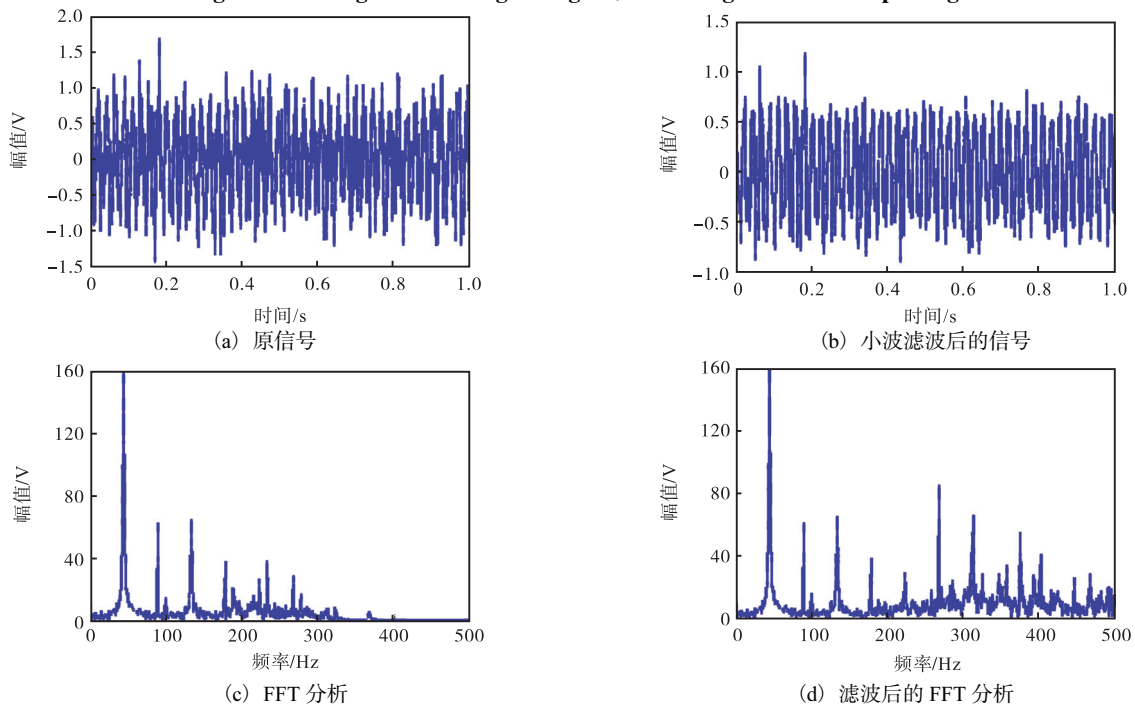


图 9 砂轮机原信号、小波滤波后信号及其频谱图

Fig. 9 Grinding machine original signal, wavelet denoise signal and their spectrograms

使用短时快速傅里叶变换 (STFT) 和魏格尔分布 (WVD) 两种时频方法对砂轮机的振动信号进行分析, 这两种方法分析结果如图 10 所示。

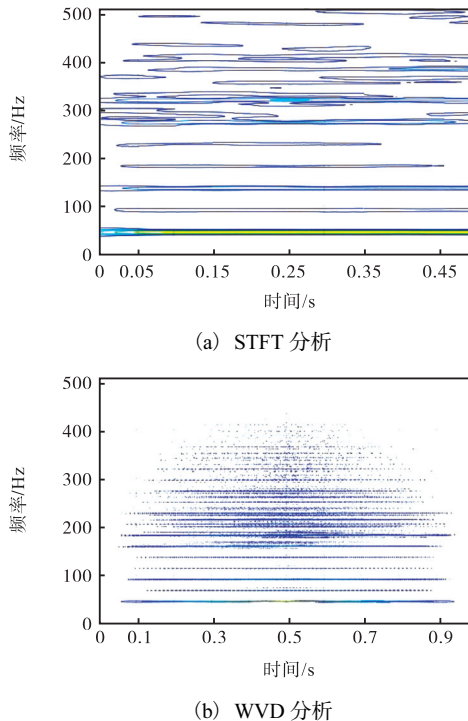


图 10 砂轮机振动信号 STFT、WVD 时频谱图

Fig. 10 STFT and WVD time-frequency spectrograms of the grinding machine

经 STFT 分析后, 得到 1 倍频约 50 Hz 频率成分最为突出, 而 3 倍频约 150 Hz 的频率成分也较明显, 2、4、5 倍频的频率成分隐约可见, 在 300 ~ 400 Hz 范围内存在比较多频率成分。由 WVD 分析结果可见, 频率分辨率明显增加, 但出现不可知的频率成分交叉项, 1 倍频的频率成分也最为突出。

上述几种方法的分析得到砂轮机振动信号 1、3 倍频的特征频率成分突出, 根据旋转机械故障诊断理论^[12]可知, 砂轮机运行时存在严重偏心而造成运转不平衡, 导致振动剧烈。测后更换砂轮, 振动与噪声恢复正常。

6 结 语

应用 COM 组件技术, 可以将 MATLAB 强大的信号处理与分析功能、图形处理能力和 Delphi 灵活高效的程序设计能力相结合, 实现混合编程。开发集信号处理与多功能分析于一体的振动测试系统可以脱离于 MATLAB 环境, 以执行文件的形式独立运行于 Windows 环境。本系统为更好提取非平稳信号频

率特征成分信息提出了多种新的时频组合方法, 是对时频分析进行补充和完善。通过仿真信号分析和实例测试, 验证了系统的可靠性, 可应用于振动信号处理与分析, 尤其是非平稳信号的分析。

该系统主要优点: 实现 32 通道信号同时大容量数据采集显示与存盘; 对采集后的数据可以回放分析; 根据信号分析要求选择不同的数字滤波处理; 根据非平稳信号的特点, 选择合适的组合时频分析, 使分析结果更为清晰。该系统存在的缺点: 缺少边采集信号边实时信号分析功能; 对于有关时频分析方法中, 输入控制参数不够全面, 分析有局限性, 如小波分析的基函数、层次数, EMD 分析中的标准差、循环次数等。

本系统具有在线帮助功能, 对 MATLAB 平台的每个函数应用都有较好的解释和理论指导, 对各个分析函数使用时作了详细的说明。

在使用本系统时, 强调说明对于不同振动信号进行预处理时, 分析要求不同, 处理是不同的。如对轴承的振动信号不应进行滤波, 要保存其信号的内部频率成分。

参考文献:

- [1] 何正嘉. 现代信号处理及工程应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.
- [2] 屈威, 钟红, 林皋, 等. 基于 LabVIEW 的多通道高铁桥梁振动测试系统的搭建[J]. 仪表技术与传感器, 2012(8): 15-18.
- [3] 唐进元, 李松, 邵文. 基于 LabVIEW 生产者-消费者模式的齿轮传动振动测试系统[J]. 机械传动, 2011, 35(1): 5-7.
- [4] 唐奕, 李祺, 王文娟, 等. 基于 LabVIEW 的振动信号分析系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(6): 218-222.
- [5] 宋波, 陈一民. 虚拟仪器开发环境的比较研究[J]. 计算机工程与设计, 2007, 28(12): 2971-2973.
- [6] 郑阿奇. MATLAB 实用教程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [7] 刘瑞新. Delphi 语言程序设计教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [8] 刘海燕, 姜麟, 胡珂, 等. 基于 Delphi 和 Matlab 的混合编程方法在交通流量估算中的应用[J]. 微计算机应用, 2009, 30(6): 62-66.
- [9] 夏玉杰, 刘雅琴. 基于 Matlab COM 组件的信号处理平

(下转第 74 页)

地恢复.

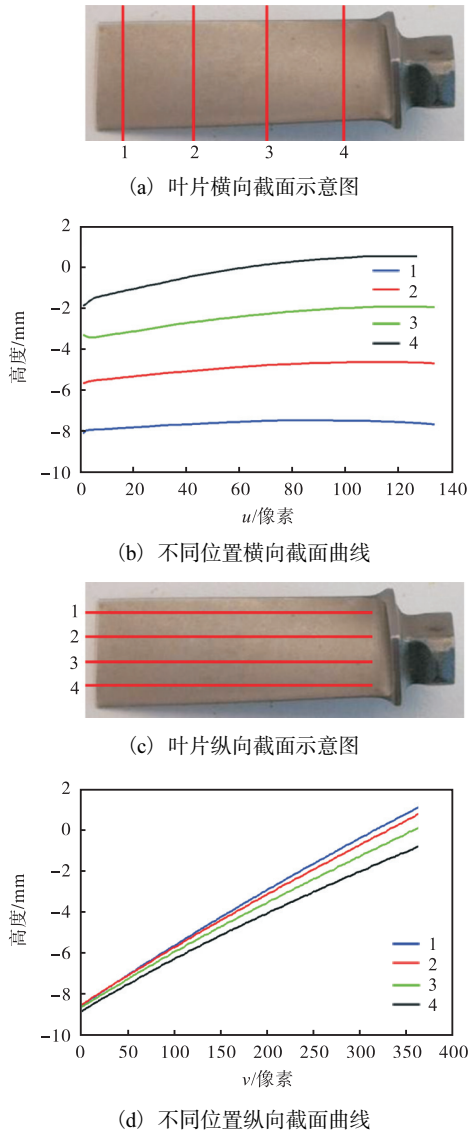


图 11 叶片截面曲线
Fig. 11 Sectional curve of the blade

3 结 语

航空发动机叶片的三维测量对叶片的加工及质

量检测具有重要意义. 鉴于此, 本文提出一种基于频闪激光光源的发动机叶片三维测量方法. 通过对叶片包裹相位的解算、展开, 实现叶片曲面的重建, 充分利用频闪激光光源光栅条纹的优点, 很好地恢复了发动机叶片的型面. 这为频闪激光光源在发动机叶片的高精度三维测量奠定了基础.

参考文献:

[1] 陆佳艳,熊昌友,何小妹,等. 航空发动机叶片型面测量方法评述[J]. 计测技术,2009,29(3):1-3.

[2] 孙青州. 叶片复杂曲面测量系统研究[D]. 长春:吉林大学,2014.

[3] 李兵,陈磊,丁建军,等. 复合式叶片型面测量系统的误差分析与补偿[J]. 中国工程科学,2013,15(1):39-44.

[4] 李凯,赵燎,李超,等. 航空发动机叶片型面轮廓光学测量技术现状及发展趋势[J]. 航空制造技术,2018,61(22):28-35.

[5] 朱麒元,常彬,王东. 航空发动机叶片加工变形因素及控制分析[J]. 南方农机,2018,49(15):170.

[6] 张现东,卜昆,董一巍. 航空发动机叶片三坐标测量优化采样方法[J]. 航空动力学报,2019,34(1):168-176.

[7] 王涛,李战,王盛,等. 基于散斑视觉测量的叶片模型重构[J]. 激光与光电子学进展,2019,56(1):232-241.

[8] 魏永超,赵伟. 航空发动机叶片高精度自动测量系统[J]. 航空动力学报,2017,32(3):513-518.

[9] 宋涛,戴士杰,周国香,等. 航空发动机叶片曲面重建研究[J]. 计算机仿真,2018,35(4):33-37.

[10] 马龙,徐泓悦,胡艳敏,等. 基于投影条纹级次识别的发动机叶片三维测量方法[J]. 激光与光电子学进展,2018,55(4):223-234.

[11] 曾凡光,吴光敏,Mai J D,等. Goldstein 枝切法对存在间断相位缺陷的解缠研究[J]. 激光技术,2014,38(3):335-341.

责任编辑:郎婧

(上接第 64 页)

台设计[J]. 计算机工程与设计,2008,29(15):4109-4110.

[10] 蔡艳平,李艾华,王涛,等. 基于 EMD-Wigner-Ville 的内燃机振动时频分析[J]. 振动工程学报,2010,23(4):430-437.

[11] Chen G H, Ma S W, Liu M, et al. Wigner-Ville distribu-

tion and cross Wigner-Ville distribution of noisy signals[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2008,19(5):1053-1057.

[12] 黄文虎,夏松波,刘瑞岩,等. 设备故障诊断原理、技术及应用[M]. 北京:科学出版社,1997.

责任编辑:周建军